

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ**

**ДОВБИШ АНДРІЙ ПЕТРОВИЧ**

**УДК 621.867**

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТРУБЧАСТОГО КОНВЕЄРА ІЗ  
СЕПАРУЮЧИМ БУНКЕРОМ**

05.05.05 – піднімально-транспортні машини

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2020

Дисертація на правах рукопису.

Роботу виконано в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:**

кандидат технічних наук, доцент  
**Герук Станіслав Миколайович,**  
Житомирський агротехнічний коледж,  
старший науковий співробітник, член – кореспондент  
інженерної академії наук України, завідувач кафедри  
агроінженерія.

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, доцент  
**Ромасевич Юрій Олександрович,**  
Національний університет біоресурсів і  
природокористування України,  
професор кафедри конструювання машин і обладнання;

кандидат технічних наук  
**Серілко Дмитро Леонідович,**  
Національний університет водного господарства та  
природокористування,  
доцент кафедри будівельних, дорожніх, меліоративних,  
сільськогосподарських машин і обладнання.

Захист відбудеться «21» лютого 2020 р. об 11:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 58.052.03 у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, аудиторія 79.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, корпус №2.

Автореферат розіслано «21» січня 2020 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

А.Є. Дячун

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Аналіз існуючих способів транспортування сипких матеріалів свідчить, що наявне обладнання за своїми технологічними характеристиками: продуктивністю, ефективністю та надійністю не повністю відповідає сучасним вимогам виробництва. Для транспортування зернових продуктів та кормових сумішей під час годівлі тварин і птиці широко застосовується конвеєрний транспорт. Трубчасті транспортери надійно (безпечно) та ефективно вирішують завдання переміщення заданої кількості кормосуміші на задану відстань у встановлений час.

Однак, існуючі скребкові конвеєри, які переміщують сипкі матеріали в направляючих трубах різної конфігурації характеризуються обмеженими функціональними можливостями, оскільки виконують лише транспортні функції. Надзвичайно важливим напрямком подальшого розвитку таких конвеєрів є розширення їх функціональних можливостей та експлуатаційних показників за рахунок поєднання в одному технологічному процесі одночасного переміщення та сепарації сипких матеріалів.

Тому створення нових конструкцій та обґрунтування конструктивно-кінематичних параметрів трубчастих скребкових конвеєрів, які забезпечують розширення технологічних можливостей, зменшення енергетичних і матеріальних ресурсів з покращеними умовами їх експлуатації та розроблення методики проектування їх робочих органів є **актуальним завданням**, що має важливе народногосподарське значення.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Розроблення конструктивної схеми удосконаленого трубчастого скребкового конвеєра та обґрунтування раціональних конструктивно-кінематичних параметрів проведено відповідно науковому напрямку досліджень Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та виконані в рамках держбюджетних тем: ДІ 233-17 «Моделювання, синтез та розробка енергоефективних транспортуючих та перевантажувальних систем для технологічної обробки насипних вантажів» (№ державної реєстрації 0117U002246); ДІ 232-17 «Розробка нового методу технічного діагностування стану зварних швів магістральних газопроводів на основі статистичного аналізу їх структурної неоднорідності» (№ державної реєстрації 0117U002245); ДІ 242-19 «Створення нового покоління методів фрактодіагностування матеріалів і конструкцій на основі використання нейронних мереж» (№ державної реєстрації 0119U001323).

Робота є складовою вирішення важливої науково-технічної проблеми з розвитку піднімально-транспортних машин, яку затверджено постановою Кабінету Міністрів України за № 452-Р від 03.08.2006 р.

**Мета і завдання дослідження.** *Метою роботи* є підвищення ефективності транспортування сипких матеріалів скребковим ланцюговим конвеєром шляхом розроблення перспективних конструкцій та вибору їх раціональних параметрів.

Для досягнення мети в роботі поставлені і вирішені такі завдання:

- провести аналіз конструкцій і теоретично обґрунтувати технологічний

процес транспортування сипких матеріалів трубчастим скребковим ланцюговим конвеєром та встановити його кінематичні і технологічні параметри;

- розробити математичну модель транспортування сипких матеріалів трубчастим скребковим ланцюговим конвеєром у місцях спряження горизонтальної та вертикальних частин конвеєра та режимів його роботи із визначенням силових, конструктивних і технологічних параметрів;

- розробити методику дослідження динаміки трубчастого скребкового ланцюгового конвеєра та встановити умови існування резонансних коливань для різних швидкостей переміщення сипкого матеріалу;

- спроектувати і виготовити стендове обладнання для дослідження характеристик трубчастих скребкових ланцюгових конвеєрів при транспортуванні сипких матеріалів;

- спроектувати і виготовити функціонально здатний зразок трубчастого скребкового ланцюгового конвеєра та провести необхідний комплекс експериментальних досліджень з виведенням рівнянь регресії залежності продуктивності, крутного моменту на приводі робочого органа під час транспортування та сепарації сипких матеріалів від режимів роботи конвеєра;

- розробити інженерну методику проектування трубчастого скребкового ланцюгового конвеєра з просторовою трасою транспортування сипких матеріалів.

**Об'єкт дослідження** – процес транспортування сипкого матеріалу вздовж криволінійних трас трубчастого конвеєра з різними робочими органами.

**Предмет дослідження** – взаємозв'язок конструктивно-технологічних параметрів трубчастих конвеєрів з їх характеристиками та функціональним призначенням.

**Методи дослідження.** Теоретичні дослідження проведено з використанням методів механіко-математичного моделювання, інформатики, теорії пружності, теоретичної механіки, вибору раціональних технічних рішень. Апробацію розроблених алгоритмів, програм і методик здійснено методом комп'ютерного моделювання. Результати експериментальних досліджень отримано за допомогою спеціально розробленого оснащення з використанням сучасних засобів та методів вимірювань. Статистичне опрацювання експериментальних даних проведено з використанням прикладних програм для ПЕОМ.

**Наукова новизна отриманих результатів.** На основі системного підходу до дослідження транспортних процесів в роботі отримано такі наукові результати:

- вперше побудовано залежності, що визначають вплив амплітудно-частотних характеристик сипкого середовища на вибір параметрів приводу трубчастого ланцюгового конвеєра-сепаратора;

- вперше розкрито динаміку трубчастого скребкового ланцюгового конвеєра вздовж кутових точок горизонтальної та вертикальної частини та встановлено умови існування резонансних коливань для різних швидкостей переміщення зернового матеріалу;

- отримали подальший розвиток математичні моделі нелінійних коливань зернового матеріалу вздовж робочого органа сепаруючого бункера під час процесу сепарації та динаміки системи ланцюговий робочий орган конвеєра -

зерно, яке транспортується.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розроблено нові конструкції робочих органів трубчастих скребкових ланцюгових конвеєрів з розширеними технологічними можливостями при транспортуванні сипких матеріалів, встановлено їх раціональні конструктивно-технологічні параметри. Розроблено стендове обладнання для проведення досліджень і визначення енергосилових параметрів процесу транспортування та сепарації залежно від режимів роботи конвеєрів та, за результатами комплексу експериментальних досліджень, напрацьовано рекомендації щодо їх використання. Здобувачем розроблено теоретичні й практичні технологічні передумови роботи робочих органів трубчастих скребкових конвеєрів, інженерна методика їх проектування. Технічна новизна розробок захищена 5-ма патентами України на корисні моделі. Отримані наукові та практичні результати, методики й рекомендації впроваджено у СОК “УВИСЛА ПЛЮС” та ТОВ НВП «Агрант».

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати роботи автор отримав самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві [1-2, 4-6], автор вивів аналітичні залежності поздовжніх коливань робочого органу конвеєра, які можна описати функцією переміщення. У працях [7-8, 11-13] здобувач вивів аналітичні залежності резонансних коливань зернової суміші в процесі вібраційної обробки, дослідив: залежність частоти власних коливань робочого органу від швидкості пересування сипкого матеріалу; динамічні напруження у привідному робочому органі на прямолінійних вітках конвеєра. У працях [10, 14] внесок здобувача полягає в постановці та опрацюванні результатів експериментальних досліджень. Здобувач також запропонував елементи конструкцій машин та механізму привода [3, 9-10]. За матеріалами досліджень у співавторстві отримано 5 патентів на корисні моделі [15-19].

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні положення виконаних досліджень доповідалися та обговорювалися на наукових конференціях та науково-технічних семінарах: IV Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів (м. Тернопіль, 2015 р.); XVII Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки», присвяченій 116-річчю з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка (17-18 жовтня, Суми, 2016 р.); XIX науковій конференції Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя (18-19 травня, Тернопіль, 2016), IV Всеукраїнській науково-практичній конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин та знарядь» (28-29 березня, Житомир, 2018 р.).

**Публікації.** Результати досліджень опубліковано в 19 наукових працях, з них 1 монографія, 10 статей – у фахових виданнях, одна з яких опублікована в журналі, що входить до міжнародної наукометричної бази Scopus, 4 – у тезах наукових конференцій, 5 патентів України на корисні моделі.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків і додатків. Роботу викладено на 152 сторінках, вона містить 64 рисунків, 11 таблиць, а також додатки. Список літератури включає 159 найменувань. Загальний обсяг дисертації становить 195 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі подано загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, визначено мету й завдання роботи, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі проведено аналіз та узагальнення відомих наукових напрацювань і проблемних питань із дослідження процесу транспортування різних матеріалів технологічними системами машин, обґрунтовано доцільність проведення досліджень.

Формування наукових основ теорії дослідження робочих процесів, проектування і конструювання робочих органів сільськогосподарських машин, методів обґрунтування їх конструкційно-технологічних схем викладено в наукових працях П.М. Василенка, В.В. Адамчука, Р.Л. Зенкова, В.М. Булгакова, Ф.К. Іванченка, В.К. Д'ячкова, В.М. Барановського та багатьох інших.

Проблеми використання скребкових конвеєрів сільськогосподарського призначення відображені в роботах В.С. Ловейкіна, В.М. Булгакова, Р.М. Рогатинського зокрема трубчаті конвеєри досліджувалися Р.Б. Гевка, О.Л. Ляшука, О.А. Бурлаки. У конструкційних розрахунках окремих деталей скребкового конвеєра приймали участь Ф.К. Іванченко, В.В. Красников, М.О. Клецкін, А.І. Борохович, Ю.О. Ромасевич, А.Н. Коробочка, М. Dolipski, E. Remiorz, A. Katunin.

Проведено патентний пошук, який дозволив визначити сучасний стан досліджуваної проблеми. Показано її актуальність і наведені результати, які не містять математичні моделі динамічного процесу переміщення сипкого матеріалу вздовж криволінійних трас за допомогою скребкового ланцюгового робочого органу. На основі проведеного аналізу визначено наукові підходи та напрямки досліджень для створення нових типів піднімально-транспортних машин, що передбачає розширення сфери та висуває підвищені вимоги до технологічних і конструктивних параметрів технологій їх проектування, завдяки чому вони набувають ширшого застосування у різних галузях.

У другому розділі наведено структурний синтез робочих органів піднімально-транспортних машин методом морфологічного аналізу з покращеними характеристиками, встановлено раціональні межі вибору типів транспортних механізмів. В результаті синтезу ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу на основі коефіцієнта конструктивних елементів, що визначає економічну доцільність використання того чи іншого конструктивного елемента було відібрано працездатні конструкції альтернативних варіантів з різними робочими органами. Це дозволило зменшити кількість варіантів синтезованих альтернатив у порівнянні з класичною моделлю, що суттєво скорочує терміни проектування транспортних засобів.

Запропонована конструкція трубчатого ланцюгового скребкового конвеєра (рис.1) для транспортування сипкого матеріалу та проведено аналіз впливу широкого спектру зовнішніх та внутрішніх чинників на процес транспортування. Для отримання диференціального рівняння, яке описує динаміку вказаної вище системи, прийнято: ланцюг, до якого приєднані круглі скребки, моделюється

одновимірним тілом, пружні властивості котрого описуються нелінійною залежністю  $s = Ee^{n+1}$ , де  $E$  - модуль пружності матеріалу для різни типів ланцюгів;  $e$  - відносна деформація розглядуваної моделі тіла в процесі транспортування;  $n$  - параметр, який вказує на відхилення інтегральних пружних характеристик системи пружний ланцюг - сипкий матеріал від лінійного закону. Бочкоподібні скребки з'єднані із круглими пружними елементами, що дозволяє їм переміщатись відносно останніх. На горизонтальній та вертикальній частинах скребкового конвеєру переміщення бочкоподібних скребків відносно привідного ланцюга є малими і ними нехтуємо. Величина швидкості  $V$  переміщення ланцюга є сталою, а сипкий матеріал, який знаходиться між сусідніми парами скребків (круглим та бочкоподібними) розподілений за однаковими законами. Відносним переміщенням сипкого матеріалу відносно ланцюга нехтуємо, а сила опору руху системи привідний ланцюг – сипкий матеріал пропорційна швидкості руху і вона є малою величиною у порівняння із максимальним значенням пружної сили ланцюга.

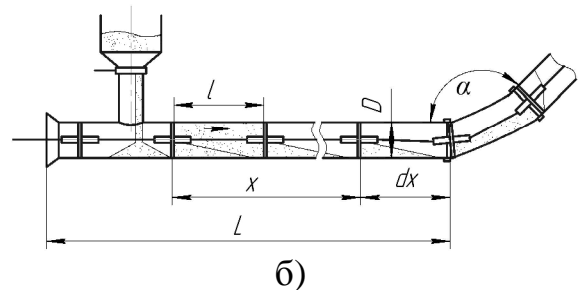
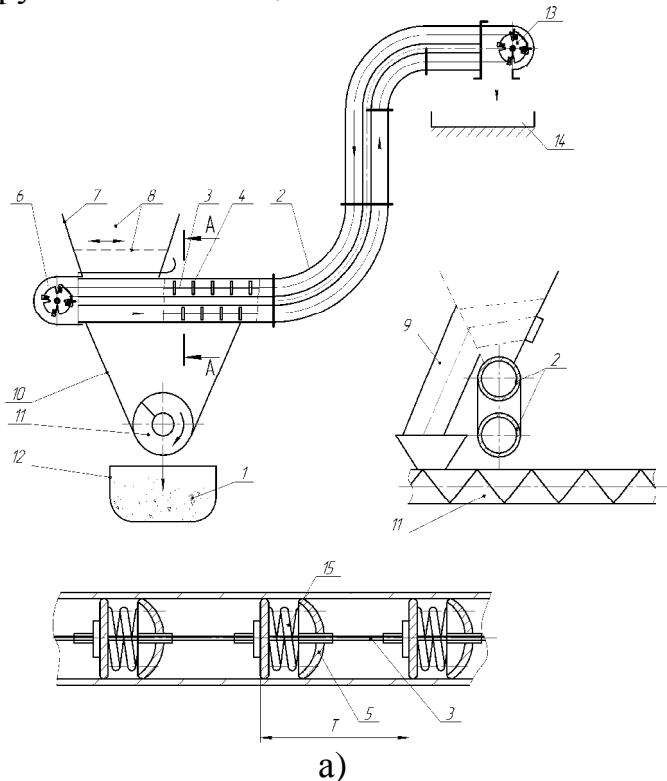


Рис. 1. Схема трубчастого ланцюгового скребкового конвеєра а) та розрахункова схема горизонтальної вітки конвеєра б)  
 1 - сипкий матеріал; 2 - S-подібні труби;  
 3 - робочий орган (ланцюг);  
 4 - направляючі скребки; 5 - бочкоподібні скребки; 6, 13 - спеціальна привідна зірочка; 7 - завантажувальний бункер; 8 - робочий орган бункера;  
 9 - відвідна труба; 10 – бункер;  
 11 - гвинтовий робочий орган;  
 12, 14 – ємність; 15 - з'єднувальна пружина скребків

Диференціальне рівняння нижньої частини системи сипкий матеріал – привідний ланцюг набуває вигляду

$$m(x) \frac{d^2 u(x, t)}{dt^2} = (n+1) E A \frac{\partial^n u(x, t)}{\partial x^n} - R \frac{\partial u(x, t)}{\partial t}, \quad (1)$$

де  $m(x)$  - закон розподілу маси досліджуваної системи сипкий матеріал – привідний ланцюг вздовж горизонтальної частини конвеєра;  $u(x, t)$  - переміщення перерізу ланцюга із Лагранжевою координатою  $x$  в довільний момент часу  $t$ ;  $E A \frac{\partial^n u(x, t)}{\partial x^n}$  - зусилля, яке діє на лівий кінець виділеного елемента зі сторони “відсіченої” частини ( $A$  - площа поперечного перерізу

ланцюга);  $EA \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \bigg|_{x+dx}^{n+1}$  - зусилля, яке діє на правий кінець виділеного елемента

зі сторони “відсіченої” частини;  $R \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} dx$  - рівнодійна сил опору, яка діє на виділений елемент,  $R = R^* a_1$ , де  $R^*$  - радіус труби;  $a_1$  - коефіцієнт пропорційності системи опору швидкості.

Привідний ланцюг рухається зі сталою відносною швидкістю  $V$  вздовж горизонтальної осі, тому у змінних Ейлера із (1) знайдено

$$m(x) \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + 2V \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x \partial t} + V^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} - (n+1) EA \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = - R \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} \quad (2)$$

До рівняння (2) долучено крайові умови, які для ланцюгового робочого елемента набувають вигляду

$$u(x,t)|_{x=0} = 0; u(x,t)|_{x=L} = l(1 - \cos a), \quad (3)$$

де  $L$  - довжина горизонтальної вітки конвеєрної лінії,  $l$  - віддаль між сусідніми бочкоподібними та круглими скребками,  $a$  - кут нахилу частини ланцюга у кутовій точці, яка знаходиться між скребками.

Якщо врахувати, що віддаль між сусідніми скребками розглядуваного конвеєра є значно більшою величиною за діаметр труби конвеєрної лінії, перша визначна границя дозволяє крайову умову на правому кінці труби подати у

вигляді  $u(x,t)|_{x=L} = \frac{D \omega^2}{2l} \cos^2 \frac{pVt}{l}$ , де  $D$  - внутрішній діаметр труби конвеєра.

Маса досліджуваної системи є неперервною функцією лінійної змінної. Її з достатнім ступенем точності можна описати залежністю  $m(x) = m_0 + m_1 \cos \frac{p}{2l} x$ ,

де  $m_0$  - маса робочого органа,  $m_1$  - маса сипкого матеріалу, причому  $m_0 \gg m_1$ . Наведене дозволяє диференціальне рівняння (2) подати у вигляді

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} - h^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = m \left( \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2}, \frac{\partial u(x,t)}{\partial t}, \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2}, \dots, \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \right) \quad (4)$$

де  $h^2 = \frac{EA(n+1)}{m_0}$ ,  $J = \frac{2pVt}{l} + j_0$ ,  $m$  - малий параметр, який вказує на відхилення інтегральних пружних характеристик від степеневого закону,  $\varphi_0$  - стала (початкова фаза періодичного збурення).

Шляхом аналізу отриманого розв'язку наведеної математичної моделі процесу транспортування сипкого матеріалу визначено швидкість транспортування, за якої мають місце резонансні коливання системи

$$V = \sqrt{\frac{EA(n+1)}{m_0} \frac{p}{L} \frac{\omega^{n+2}}{P_x} a^{\frac{n}{2}}}, \quad (5)$$

де  $a$  - амплітуду коливань привідного ланцюга;  $P_x$  - півперіод коливань.

На рис. 2. представлено залежність власної частоти системи привідний ланцюг конвеєрної лінії- сипкий матеріал (зерно) ( $W$ ) від параметрів системи та амплітуди; на рис. 3 - амплітуди резонансних коливань вказаної системи від



швидкості переміщення сипкого матеріалу.

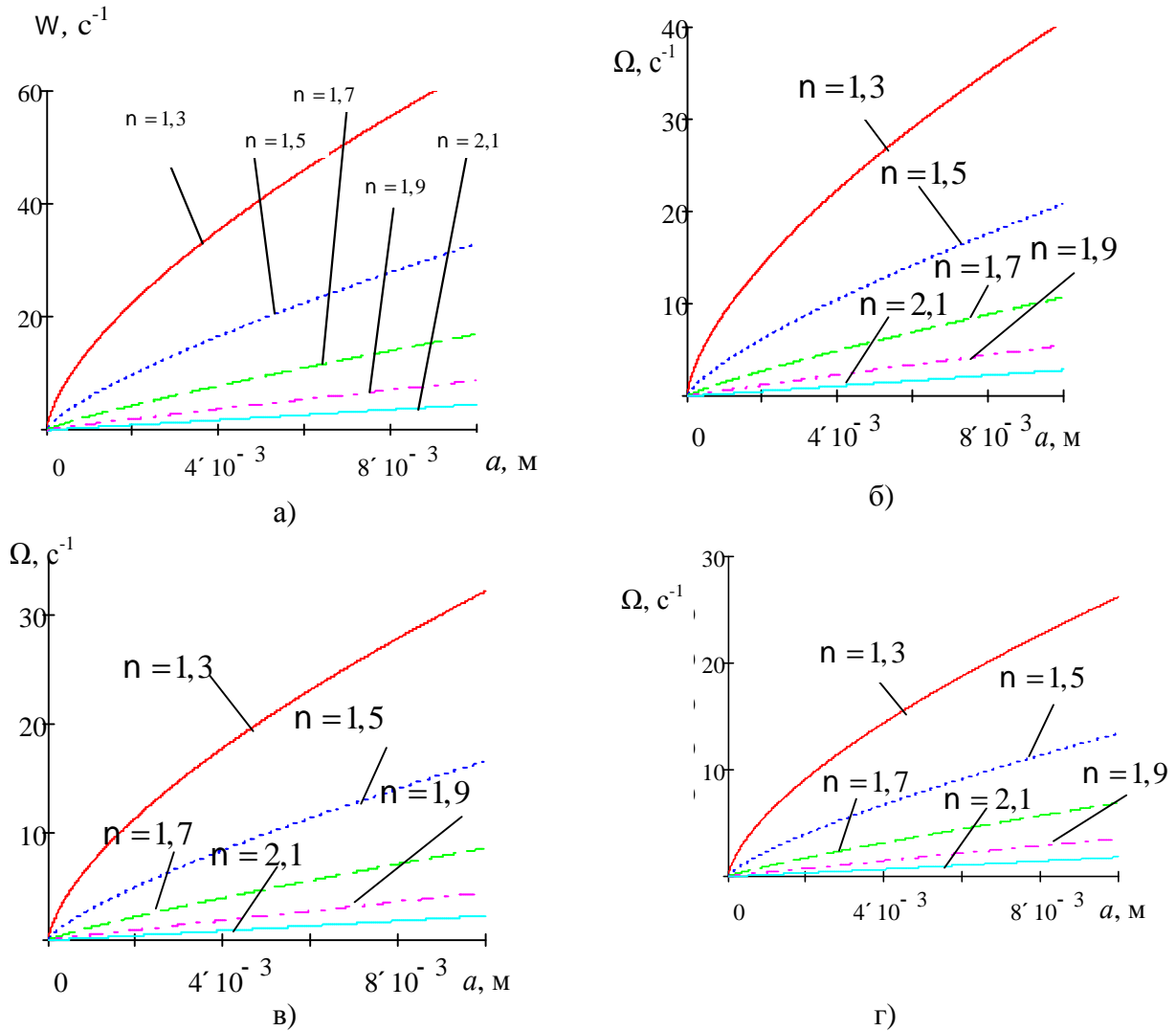


Рис. 2. Залежність власної частоти коливань системи ланцюговий привід конвеєра – сипкий матеріал за різних значень параметрів та погонних мас а) 10кг/м; б) 25кг/м; в) 40кг/м; г) 60кг/м ( $E = 1,9 \times 10^{11} \text{ Н/м}^2$ ;  $D = 0,1 \text{ м}$ )

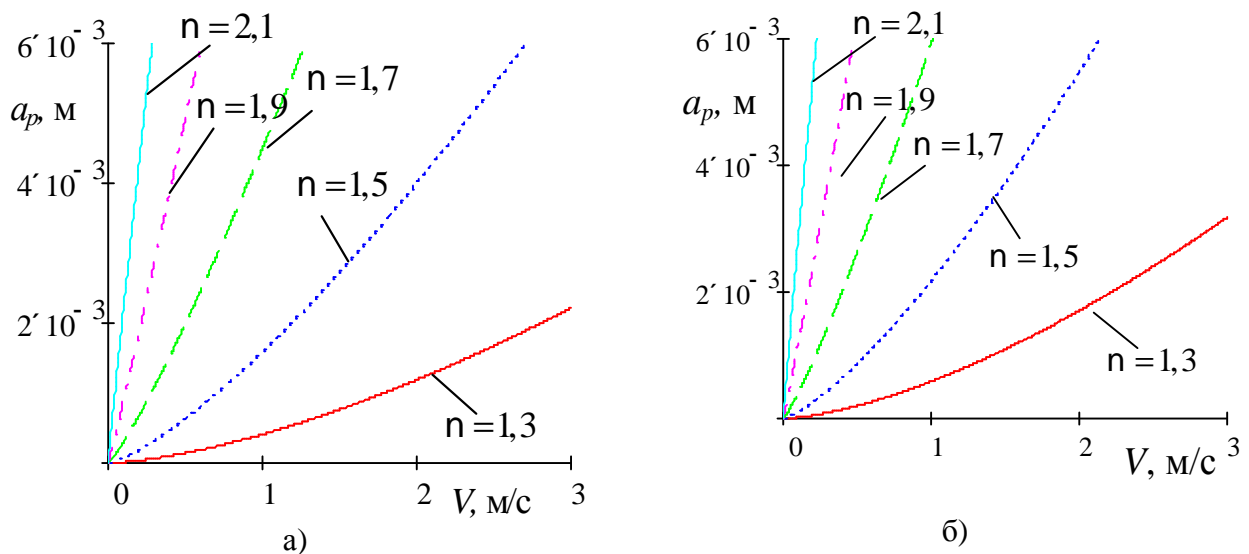


Рис. 3. Залежність амплітуди резонансу системи ланцюговий привід конвеєра – сипкий матеріал від швидкості руху привідного ланцюга за таких параметрів та погонних мас а) 25 кг/м; б) 40кг/м ( $E = 1,9 \times 10^{11} \text{ Н/м}^2$ ;  $D = 0,1 \text{ м}$ )

Із отриманих результатів випливає, що для привідних ланцюгів конвеєра: із

більшим значенням параметру нелінійності  $n$  за фіксованої амплітуди власна частота коливань є меншою; для одного і того ж ланцюга значення амплітуди резонансу для більших швидкостей транспортування сипкого матеріалу є більшим; для ланцюгів із більшим показником параметру нелінійності  $n$  амплітуда резонансу переміщення сипкого матеріалу є більшою. Значення амплітуди переходу через головний резонанс описується співвідношенням (6).

$$\frac{da}{dt} = - \frac{2R^*(n+2)^2 a}{(3n+4)P R r} \frac{\sqrt{\rho} G_c^{\frac{3}{2}} \frac{3}{n+2} \frac{\ddot{\theta}}{\ddot{\theta}}}{G_c^{\frac{1}{2}} + \frac{3}{n+2} \frac{\ddot{\theta}}{\ddot{\theta}}} - \frac{\hat{H} w^2}{2R a r W(a)} \sin J, \quad (6)$$

де  $P$  - норма власної форми коливань;  $\Gamma(\dots)$  - гама функція відповідного аргументу;  $\hat{H}$  - приведена величина зовнішнього збурення;  $\Gamma$  - погоня маса робочого органа;  $w = \frac{2\rho V}{l}$  - частота зовнішнього збурення,  $\Omega$  - власна частота коливань привідного робочого органа (ланцюга).

Для деяких значень параметрів досліджуваної системи представлено якісну та кількісну картину (рис. 4) переходу через головний резонанс.

Наведено динамічні навантаження у привідному ланцюзі конвеєра під час резонансних коливань, що зумовлене видовженням горизонтальної частини ланцюга конвеєра на величину  $DL$

$$T_0 = A \times E \times \frac{DL}{L} \frac{\ddot{\theta}^{n+1}}{\ddot{\theta}} \Rightarrow DL = L \frac{A \times E}{T_0} \frac{\ddot{\theta}^{n+1}}{\ddot{\theta}}, \quad (7)$$

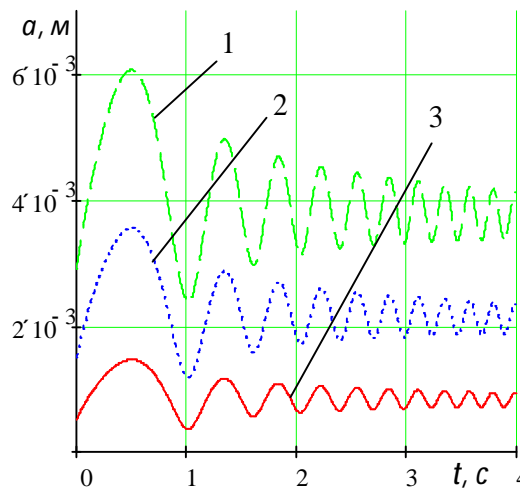
$T_0$  – натяг робочого органа (ланцюга).

Під час переходу через резонанс максимальне значення динамічної деформації ланцюга рівне значенню відповідної амплітуди. Отже, найбільше максимальне нормальне динамічне напруження у прямолінійній вітці ланцюга рівне:

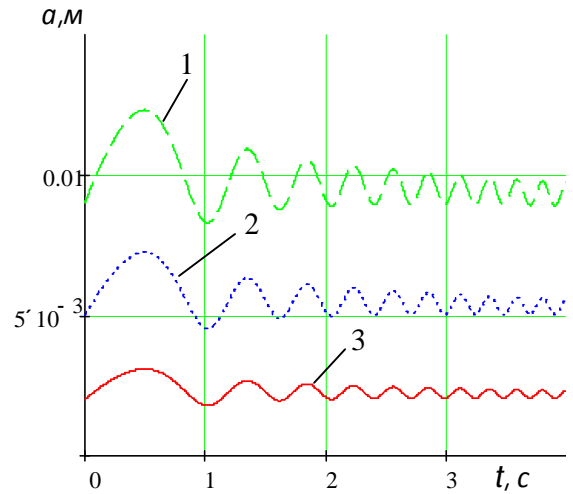
$$\bar{s} = \frac{\bar{T}}{A} = \frac{E}{AL^{n+1}} (a^{n+1} + (n+1)a^n DL). \quad (8)$$

Встановлено, що динамічне напруження у привідному ланцюгу є більшим для більших швидкостей транспортування зерна, і меншим для привідних ланцюгів із більшим значенням параметру нелінійності  $n$ .

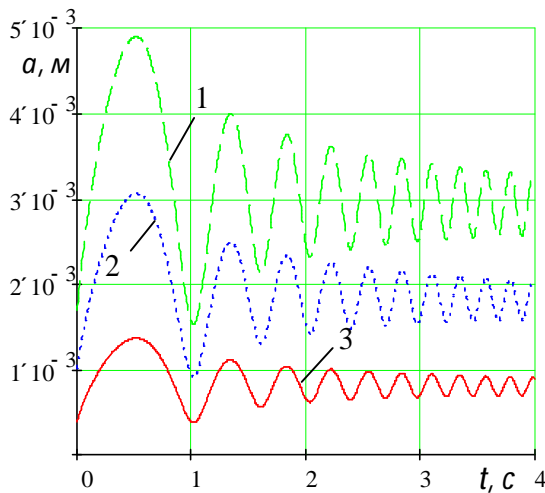
В процесі транспортування здійснюється сепарація сипкого матеріалу для зберігання за допомогою трубчастих конвеєрних ліній. Продуктивність роботи сепаруючого бункера керованого типу визначається внутрішніми та зовнішніми чинниками. До перших із них треба віднести фізико-механічні характеристики, геометричні характеристики сипкого матеріалу, її здатність зберігати або змінювати свою структуру під час процесу сепарації. Зовнішні чинники: геометричні розміри; характеристики сит, вздовж яких рухається зернова суміш під час сепарації; їх кут нахилу до горизонту; способи збурення коливань корпусу сепаратора та подання напрямленого потоку повітря з метою доведення зерна до необхідної вологості.



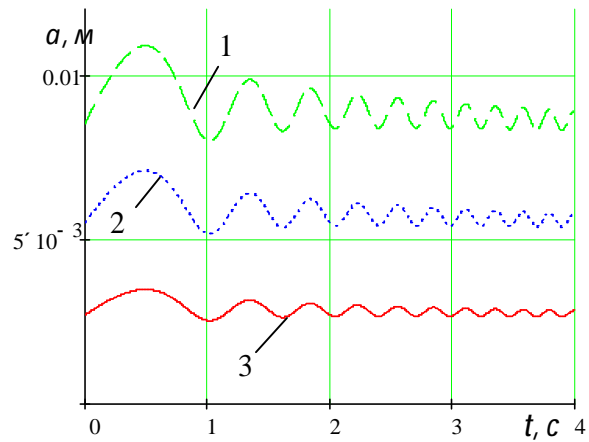
а)



б)



в)



г)

Рис. 4. Закон зміни амплітуди коливань привідного ланцюга під час переходу через резонанс за різних значень параметрів  $L=10..20\text{м}$ ,  $m_0=40...60\text{кг/м}$ ,  $D=0,1\text{м}$ ;  $l=0,2...0,4\text{м}$ ;  $n=1,3...1,9$ ; 1 -  $V=3\text{м/с}$ ; 2 -  $V=2\text{м/с}$ ; 3 -  $V=1\text{м/с}$  а) 1-  $a_{p1}=5,64 \times 10^{-4}\text{м}$ ; 2-  $a_{p2}=1,638 \times 10^{-3}\text{м}$ ; 3-  $a_{p3}=3,057 \times 10^{-3}\text{м}$ ; б) 1-  $a_{p1}=5,64 \times 10^{-4}\text{м}$ ; 2-  $a_{p2}=1,638 \times 10^{-3}\text{м}$ ; 3-  $a_{p3}=3,057 \times 10^{-3}\text{м}$ ; в) 1-  $a_{p1}=4,171 \times 10^{-4}\text{м}$ ; 2-  $a_{p2}=1,05138 \times 10^{-3}\text{м}$ ; 3-  $a_{p3}=1,805 \times 10^{-3}\text{м}$ ; г) 1-  $a_{p1}=2,803 \times 10^{-3}\text{м}$ ; 2-  $a_{p2}=5,823 \times 10^{-3}\text{м}$ ; 3-  $a_{p3}=8,923 \times 10^{-3}\text{м}$

Стосовно умов роботи запропонованої конструкції трубчатого ланцюгового скребкового конвеєра (рис. 1) та розрахункової схеми (рис. 5) побудовано математичну модель пошарового руху сипкого матеріалу із сепарацією, в основі котрої лежить гіпотеза Кельвіна  $s_i = E_i e_i^{n_i+1} + m_i f(e_i, \dot{e}_i)$ , де  $s_i$  - нормальне напруження у шарі зернової суміші,  $e_i$  - відносна деформація розглядуваної моделі

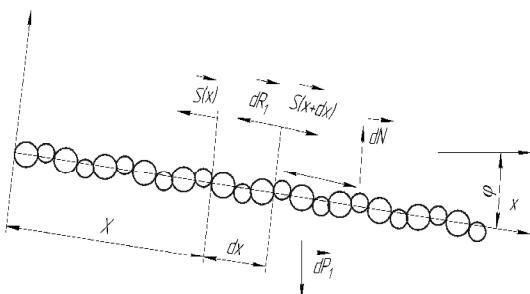


Рис. 5. Розрахункова схема шару сипкого матеріалу під час процесу сепарації та розподіл сил, які діють на умовно виділений його елемент

сипкого матеріалу в процесі сепарації,  $\dot{e}_i = \frac{de_i}{dt}$  - її швидкість,  $E_i$  - інтегральний "модуль пружності" зернової суміші,  $n_i$  та  $m_i$  - параметри, які вказують на відхилення інтегральних пружних характеристик сипкого матеріалу від лінійного та степеневих законів ( $m_i$  - малий параметр). Для довільно

розміщеного елементу шару  $dx$  сипкого матеріалу, яка рухається вздовж сита, нахиленого під кутом  $j$  до горизонту і піддається сепарації можна записати рівняння “динамічної рівноваги” (рис. 5).

$$\dot{S}(x) + \dot{S}(x+dx) + d\dot{P}_1 + d\dot{R}_1 + d\dot{N} + d\dot{\Phi} = 0, \quad (9)$$

де  $\dot{S}(x), \dot{S}(x+dx)$  - сили, які діють на верхній та нижній кінець виділеного елементу зі сторін “відсіченої” частини;  $d\dot{P}_1, d\dot{N}, d\dot{R}_1$  - відповідно вага виділеного елементу, нормальна реакція (нормальна складова сили, із якою сито діє на виділений елемент) та сила опору, величина якої вважається пропорційною швидкості руху сипкого матеріалу вздовж сита;  $d\dot{\Phi}$  - сила інерції виділеного елементу. Для переміщення верхнього кінця умовного перерізу сипкого матеріалу в напрямку паралельному до сита (відповідно відносна його деформація рівна  $\frac{Dw}{Dx} = \frac{\partial w}{\partial x} = e_1$ ) отримуємо

$$S(x+dx) - S(x) = \frac{\partial}{\partial x} \left( (n_1 + 1) E_1 A_1 \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} + m_1 f \frac{\partial w(x,t)}{\partial x} \right) dx. \quad (10)$$

Сила інерції виділеного елементу рівна добутку його маси на абсолютне прискорення, тому маємо

$$d\Phi = dm_1 \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} - H w_1^2 \cos(w_1 t + y) \quad (11)$$

де  $dm_1 = r_1 dx$  - маса виділеного елементу;  $H \cos(w_1 t + y)$  - закон переносного руху сепаруючого бункера ( $H, w_1, y$  - відповідно амплітуда, частота, початкова фаза зовнішнього періодичного горизонтального збурення бункера);  $r_1$  - маса одиниці довжини сипкого матеріалу,  $A_1$  - площа перерізу “умовної балки сипкого матеріалу”.

Диференціальне рівняння, яке описує динаміку сипкого матеріалу в процесі сепарації зерна за уточненої фізичної моделі взаємодії, яка описується узагальненим законом пружності (узагальнена модель Кельвіна) має вигляд

$$\frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} + 2V_1 \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x \partial t} + V_1^2 \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial w(x,t)}{\partial x} \frac{dV_1}{dt} + \frac{b}{r_1} \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} - \frac{E_1 A_1 (n_1 + 1)}{r_1} \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} = m_1 f \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} + \frac{H w_1^2}{r_1} \cos(w_1 t + f), \quad (12)$$

де  $b$  - коефіцієнт пропорційності у силі опору середовища,  $V_1$  - швидкість руху сипкого матеріалу.

Динамічний процес сепарації залежить від вигляду взаємодії сипкого матеріалу із стінками бункера. Їх будемо моделювати, відповідно до прийнятої фізичної моделі, крайовими умовами “балочного типу” (із шарнірним закріпленням кінців). Наведене дозволяє записати початкові умови для рівняння (12) у вигляді

$$w(x,t)|_{x=0} = w(x,t)|_{x=l} = 0. \quad (13)$$

В основу процесу сепарації сипкого матеріалу будуть прийняті незначні обмеження технологічного процесу, а саме: 1. Кут нахилу сита до горизонту, вздовж яких переміщається сипкий матеріал є невеликим; 2. Амплітуда зовнішнього збурення сепаруючого бункера є обмеженою величиною, а частоту може оператор змінювати у широкому діапазоні; 3. Із наведеного вище випливає, що відносна швидкість сипкого матеріалу вздовж сита є повільно змінною функцією часу, до того ж вона приймає обмежене максимальне значення; 4. Максимальне значення сили опору під час коливань бункера вздовж сита є малою величиною у порівнянні із максимальним значенням сили внутрішньої пружної сили взаємодії зерен.

Для визначення характеристик власних коливань сипкого матеріалу під час руху вздовж сита сепаруючого бункера без урахування зовнішнього збурення наведено диференціальне рівняння

$$\frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} - a_2 \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\partial w(x,t)}{\partial x} \frac{\partial \ddot{w}(x,t)}{\partial x} = m_1 g \frac{\partial w(x,t)}{\partial x}, \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} \frac{\partial \ddot{w}(x,t)}{\partial t} \quad (14)$$

із початковими умовами (13). У рівнянні (14)  $a_2$  - стала, яка визначається через пружні характеристики системи і її поgonу масу,  $g(\dots)$  – відома функція.

На основі аналітичного розв'язку крайової задачі (14), (13) отримано аналітичні (15) та побудовані графічні залежності частоти коливань сипкого матеріалу в часі (рис. 6); частоти від швидкості сипкого матеріалу за різних значень  $n_1$  (рис. 7).

$$\frac{da}{dt} = - \frac{2b(n_1+2)^2 a_1}{(n_1+4)P_1 R_1} \frac{\sqrt{\rho} G_c^{\frac{3}{2}} \ddot{w}}{G_c^{\frac{3}{2}} + n_1 + 2 \frac{\ddot{w}}{\ddot{\phi}}}, \frac{dy}{dt} = a_2 a_1^{\frac{n_1}{2}} \frac{\partial^{\frac{n_1+2}{2}} w}{\partial t^{\frac{n_1+2}{2}}} - \frac{(n_1+2)^2}{4P_1 R_1 a_1^{\frac{n_1}{2}}} V_1^2 \frac{\sqrt{\rho} G_c^{\frac{3}{2}} \ddot{w}}{(n_1+4)G_c^{\frac{3}{2}} + n_1 + 2 \frac{\ddot{w}}{\ddot{\phi}}} \frac{\partial^{\frac{n_1}{2}} w}{\partial t^{\frac{n_1}{2}}} \quad (15)$$

У співвідношеннях (15)  $P_{x1}$ ,  $P_1$  – відповідно, півперіод та норма власної форми коливань робочого органа сепаруючого бункера,  $a_1$  – амплітуда робочого органа сепаруючого бункера,  $P_1$  – півперіод коливань.

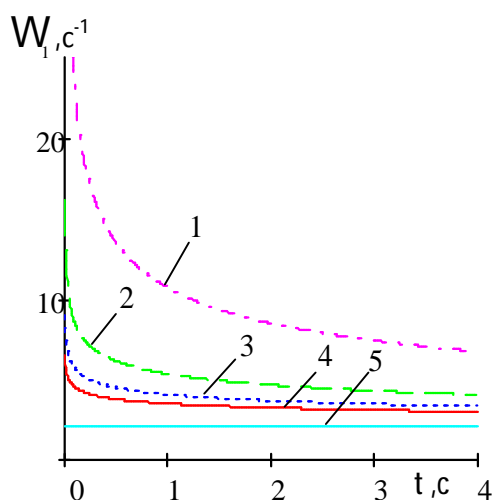


Рис. 6. Графіки зміни частоти коливань сипкого матеріалу в часі

1)  $n_1 = \frac{4}{5}$ , 2)  $n_1 = \frac{2}{3}$ , 3)  $n_1 = \frac{4}{9}$ , 4)  $n_1 = \frac{2}{9}$ , 5)  $n_1 = 0$

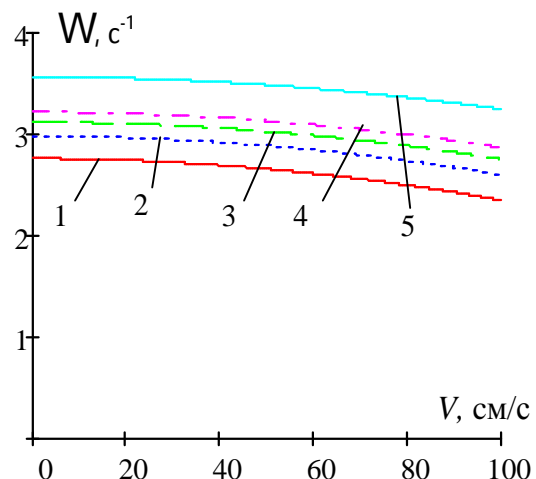


Рис. 7. Графік зміни частоти коливань сипкого матеріалу від його швидкості

1)  $n_1 = \frac{4}{5}$ , 2)  $n_1 = \frac{2}{3}$ , 3)  $n_1 = \frac{4}{9}$ , 4)  $n_1 = \frac{2}{9}$ , 5)  $n_1 = 0$

Отримані результати показують, що: для значень параметру  $-1 < n_1 < 0$  - більшим значенням параметру  $n_1$  відповідає більше значення частоти власних коливань сипких матеріалів (за всіх інших незмінних параметрів) та більшим значенням амплітуди власних коливань відповідає менше значення частоти власних коливань; більшим значенням амплітуди власних коливань сипких матеріалів відповідає менше значення частот власних коливань; частота власних відносних коливань сипких матеріалів вздовж сита за більших значень швидкості відносного її руху є меншою.

При динамічному процесі сепарації сипкого матеріалу власна частота її коливань вздовж робочого органа сепаруючого бункера залежить від амплітуди, а отже процес сепарації заданого матеріалу визначається амплітудою коливань.

У **третьому розділі** наведено програму та методику проведення експериментальних досліджень, представлено конструкцію стендового оснащення для проведення експериментів. Для проведення експериментальних досліджень процесу розроблено та виготовлено трубчастий ланцюговий транспортер (рис. 8), привідний обертовий диск процесу сепарації та транспортування сипких матеріалів.

Для керування частотою обертання привідного обертового диска (рис. 8) використовували стандартне ліцензоване програмне забезпечення Power Suite V2.3.0. Воно призначене для регулювання керуючого пристрою Altivar 71 та узгодження його перетворювачів частоти, зчитування даних з керуючого пристрою, виведення їх на монітор комп'ютера у вигляді числових значень або графічних побудов.

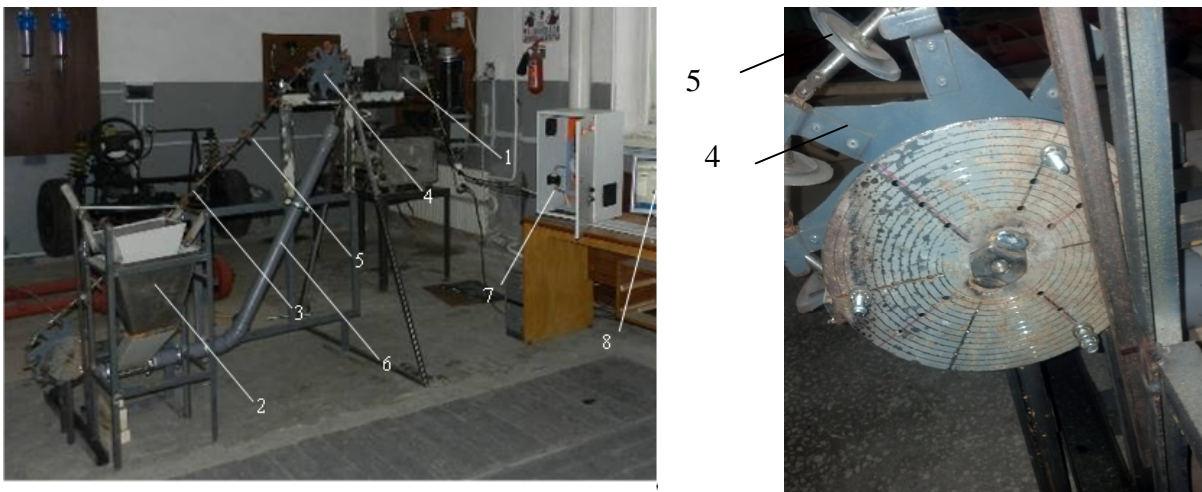


Рис. 8. Загальний вигляд експериментальної установки:

- 1 – привід конвеєра; 2 – засипний бункер; 3 – робочий орган; 4 – привідна зірочка;  
5 – скребок; 6 – транспортна магістраль; 7 – перетворювач частоти; 8 – персональний комп'ютер

При проведенні дослідів із сепарацією сипкого матеріалу вивчався вплив вмісту крупних домішок вихідного матеріалу за наступних параметрів транспортера-сепаратора: кут нахилу –  $10-20^\circ$ ; швидкість руху трубчастого скребкового конвеєра знаходилася в межах  $0,34 - 0,8$  м/с. Вологість заміряли вологоміром марки Grain Moisture Meter MD7822. Дослідження із визначення продуктивності конвеєра проводились при транспортуванні таких матеріалів з відповідною об'ємною масою: горох –  $700 \text{ кг/м}^3$ ; пшениця –  $760 \text{ кг/м}^3$  з



вологістю, яка становить  $W=10...18\%$ , що дозволило побудувати аналітичні регресійні рівняння.

У четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень продуктивності та крутного моменту транспортування сипкого матеріалу трубчастим скребковим ланцюговим конвеєром. На основі проведеного багатофакторного експерименту продуктивність  $Q = f(D, K_3, V)$  і крутний момент  $T = f(D, K_3, t_1)$ , визначені експериментальним шляхом та побудовані відповідні графічні залежності (рис. 9-10).

Після перевірки адекватності апроксимуючої моделі й оцінювання значущості коефіцієнтів рівняння регресії згідно з критеріями Фішера та Ст'юдента отримано рівняння регресії у вигляді функцій  $Q = f(D, K_3, V)$ ,  $T = f(D, K_3, t_1)$ , які описують характер зміни продуктивності трубчастого скребкового конвеєра і крутного моменту, від зміни трьох основних факторів: коефіцієнта заповнення  $K_3$ , внутрішнього діаметра труби  $D$ , м, лінійної швидкості транспортування  $V$ , м/с та кроку робочого органа  $t_1$ , м, для продуктивності в межах  $0,08 \leq D \leq 0,12$  (м);  $0,4 \leq K_3 \leq 0,8$ ;  $0,34 \leq V \leq 0,86$  (м/с), а для крутного моменту  $0,08 \leq D \leq 0,12$  (м);  $0,4 \leq K_3 \leq 0,8$ ;  $0,1 \leq t_1 \leq 0,2$  (м).

Загальний вигляд рівняння регресії продуктивності транспортування гороху за результатами проведених ПФЕ 3<sup>3</sup> у кодованих величинах дорівнюють:

$$Q_{\text{горох}} = 3,326 \times 10^3 - 8,913 \times 10^3 K_3 - 9,708 \times 10^3 V - 282,369 \times 10^3 D^2 + 98,595 \times 10^3 DK_3 + 79,653 \times 10^3 DV + 8,090 \times 10^3 KV. \quad (16)$$

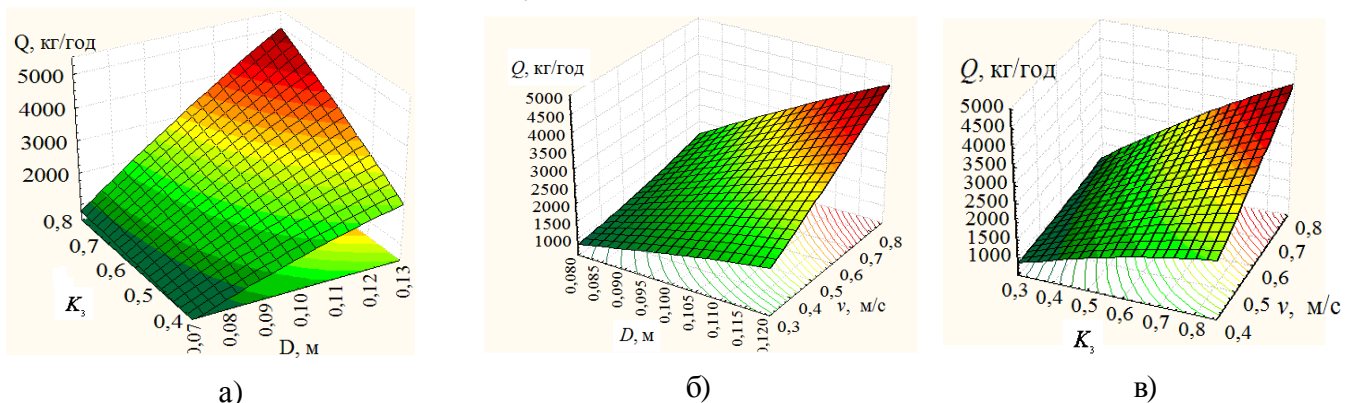


Рис. 9. Поверхні відгуку продуктивності транспортування гороху:

а)  $Q = f(D, K_3)$ ; б)  $Q = f(V, D)$ ; в)  $Q = f(V, K_3)$

Величина передавання максимального крутного моменту для транспортування пшениці на експериментальній установці:

$$T_{\text{пшениця}} = 33,39 - 0,679 \times 10^3 D - 0,034 \times 10^3 K_3 + 3,174 \times 10^3 D^2 + 0,654 \times 10^3 DK_3 - 0,027 \times 10^3 K_3 t_1. \quad (17)$$

На основі проведеного багатофакторного експерименту побудовані поверхні відгуку та визначено максимальну продуктивність при транспортуванні сумішей сипких матеріалів трубчастим скребковим конвеєром (пшениця, горох) при вологості матеріалу, яка складала  $W=12...15\%$ . Для гороху продуктивність становила в межах  $Q=2100...5200$  кг/год, що на 20-25% більше, ніж для пшениці.

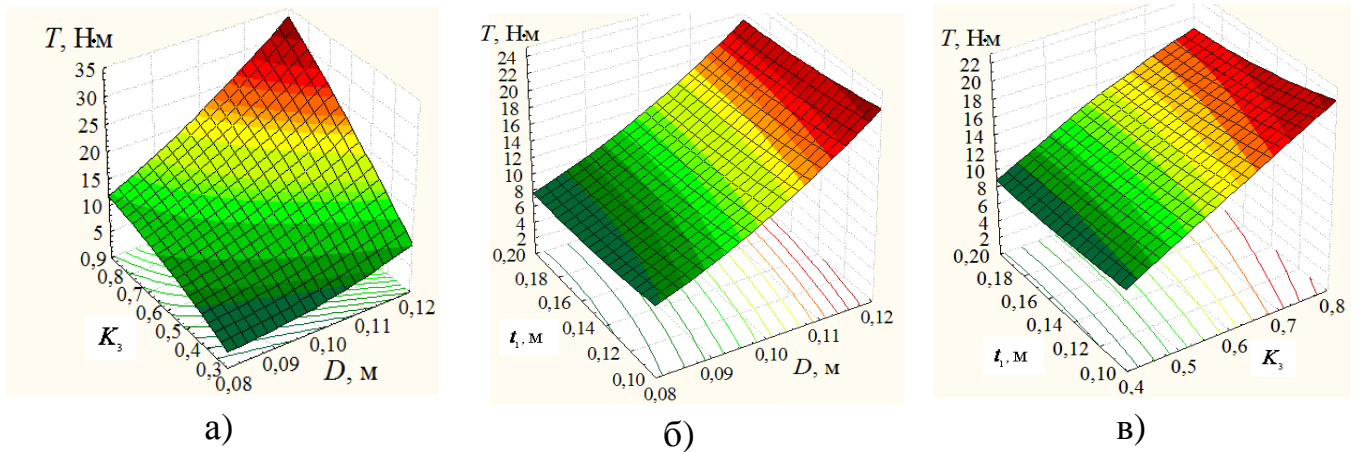


Рис. 10. Поверхні відгуку крутного моменту транспортування пшениці:

а)  $Q = f(D, K_3)$ ; б)  $Q = f(D, t_1)$ ; в)  $Q = f(K_3, t_1)$

На основі проведеного комплексу експериментальних досліджень виведено регресійні залежності для визначення ефективного просівання при транспортуванні трубчастим скребковим конвеєром по криволінійних трасах для матеріалів горох, пшениця та побудовано поверхні відгуку.

$$E_{\text{пшениця}} = 85,87 + 64,25\varepsilon_3 + 18,85V + 0,0067j_3^2 - 244,54\varepsilon_3^2 - 16,42V^2, \quad (18)$$

де  $\varepsilon_3$  - ексцентриситет привідного обертового диска;  $\varphi_3$  - кут нахилу робочого органа сепаруючого бункера.

Встановлено, що для ефективного просівання обрані раціональні значення параметрів лежать в межах: швидкість подачі матеріалу – 0,34...0,86 м/с; кут нахилу робочого органа сепаруючого бункера – 10...20°. Енергоємність сепарації зернової маси залежить від кута нахилу, швидкості транспортування матеріалу та питомого навантаження і за раціональних їх значень  $V = 0,6$  м/с;  $q = 0,9\text{--}4,7$  кг/год $\times$ см<sup>2</sup>,  $\alpha_3 = 10\text{--}20^\circ$ , становить 0,42–1,7 кВт.

Встановлено, що трубчасті скребкові конвеєри в порівнянні з іншими конвеєрами забезпечують зменшення коефіцієнту травмування у 1,5...2 рази, при цьому на процес травмування найбільше впливає перевищення швидкості руху робочого органа.

**У п'ятому розділі** наведено нові типи трубчастих ланцюгових конвеєрів для транспортування сипких матеріалів в агропромисловому комплексі вздовж криволінійних трас із забезпеченням екологічно чистого технологічного процесу. Приведено розрахунок трубчастого ланцюгового скребкового конвеєра з просторовою трасою транспортування на трьох ділянках трас: похилих, радіусних і криволінійних ділянках з різними кутами нахилу транспортування і виведена аналітична залежність для визначення необхідної потужності двигуна при заданій швидкості переміщення і продуктивності їх роботи. Проведено техніко-економічне обґрунтування, що проводиться на основі їх порівняльної оцінки з типовими представниками машин, які здійснюють однотипні операції. Розроблені на базі запатентованих конструкцій трубчасті ланцюгові конвеєри були впроваджені для використання впродовж 2016-2018 рр. в СОК "УВИСЛА ПЛЮС" (використання трубчастого ланцюгового конвеєра) та ТОВ НВП «Агрант», м. Житомир (трубчастий ланцюговий транспортер). Економічний ефект від використання трубчастого ланцюгового конвеєра становить 15170 грн.



## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У дисертації вирішена науково-прикладна задача, яка полягає у підвищенні функціональних та експлуатаційних показників процесу сепарації та транспортування сипких матеріалів шляхом розроблення нових конструкцій трубчастих ланцюгових конвеєрів та робочих органів з обґрунтуванням їх раціональних конструктивних, силових та кінематичних параметрів.

2. Проведені теоретичні розрахунки коливань привідного ланцюга конвеєра, який транспортує сипкий матеріал та зумовлених внутрішніх періодичних збурень. Встановлено умови існування резонансних коливань для різних швидкостей переміщення сипкого матеріалу. Показано, що максимальне динамічне напруження у ланцюгу є більшим для більших величин швидкості транспортування сипкого матеріалу: зростання швидкості транспортування від 1 м/с до 2 м/с, що спричиняє при  $n = 1,3$  та довжини траси  $L = 20$  м збільшення динамічного напруження у 5,2 рази, а зростання швидкості від 2 м/с до 3 м/с за тих же параметрів – у 3 рази.

3. Для дослідження динаміки зернової суміші та процесу сепарації розроблено методику визначення її основних фізико-механічних характеристик. Встановлено:

- власна частота коливань сипкого матеріалу, а відтак, процес сепарації залежить від амплітуди його коливань, до того ж, для сипких матеріалів із параметром нелінійності пружних характеристик  $-1 < n_1 < 0$  більшим значенням амплітуди коливань зернового матеріалу вздовж сита відповідає менше значення власної частоти коливань;
- збільшення відносної швидкості (до 1 м/с) сипких матеріалів вздовж сита спричиняє зменшення власної частоти коливань (до 4%);
- амплітуда переходу через резонанс сипких матеріалів приймає більші значення для повільнішого переходу через резонанс.

4. Розроблені конструкції трубчастих ланцюгових конвеєрів та стендове обладнання з використанням перетворювача частоти Altivar 71 і програмного забезпечення PowerSuite v.2.5.0 дозволили провести комплекс експериментальних досліджень із визначенням продуктивності  $Q$  та крутного моменту  $T$  від основних факторів: коефіцієнта заповнення  $K_3$ , внутрішнього діаметра труби  $D$ , лінійної швидкості транспортування  $V$  та кроку розміщення скребків робочого органа  $t_1$ , тобто,  $Q = f(D, K_3, V)$ ,  $T = f_1(D, K_3, t_1)$ .

5. На основі комплексу експериментальних досліджень отримано регресійні залежності для визначення ефективного просівання, продуктивності та крутного моменту при транспортуванні трубчастим скребковим конвеєром по криволінійних трасах для матеріалів горох та пшениця. Встановлено, що:

- для ефективного просівання раціональні значення параметрів лежать в межах: швидкість подачі матеріалу – 0,34...0,86 м/с; кут нахилу сита – 10...20°;
- енергоємність в процесі сепарації зернової маси залежить від вказаних вище параметрів та питомого навантаження  $q_{num}$  і за раціональних їх значень  $V = 0,6$  м/с;  $\alpha = 10\text{--}20^\circ$ ;  $q_{num} = 0,9\text{--}4,7$  кг/год $\times$ см<sup>2</sup> становить 0,42–1,7 кВт.

6. На основі проведеного багатофакторного експерименту побудовано

поверхні відгуку та визначено максимальну продуктивність при транспортуванні сумішей сипких матеріалів трубчастим скребковим конвеєром (пшениця, горох) при вологості матеріалу, яка складала  $W = 10 \dots 18\%$ . Для гороху продуктивність становила в межах  $Q = 2100 \dots 5600$  кг/год, що на 20-25% більше, ніж для пшениці.

7. На основі проведених досліджень встановлено, що трубчасті скребкові конвеєри, в порівнянні з іншими конвеєрами забезпечують зменшення коефіцієнту травмування зерна у 1,5...2 рази, при цьому на процес травмування найбільше впливає перевищення швидкості руху конвеєра.

8. Встановлено, що використання сепаруючого бункера дозволяє відсіювати 70-90% домішок, що запобігає засмічуванню трубопровода дрібнодисперсними відходами на криволінійних траєкторіях та знижує на 10-20% енергоємність процесу транспортування.

9. Проведене техніко-економічне обґрунтування нових конструкцій скребкових конвеєрів на основі їх порівняльної оцінки з типовими представниками машин, які здійснюють однотипні операції та розроблено методику їх інженерного проектування. Технічна новизна розроблених конструкцій захищена патентами України на корисні моделі і частково результати досліджень були впроваджені в СОК “УВИСЛА ПЛЮС” (використання трубчастого ланцюгового конвеєра) та ТОВ НВП «Агрант», м. Житомир (трубчастий ланцюговий транспортер). Економічний ефект від використання трубчастого ланцюгового конвеєра становить 15170 грн.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Монографія*

1. Створення та модернізація транспортно-технологічних механізмів машин і обладнання: монографія / О.Л. Ляшук, Р.Б. Гевко, В.О. Дзюра, О.М. Кирик, А.П. Довбиш – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2019. – 167 с. *(Автор розробив математичну модель транспортування сипкого матеріалу по криволінійних трасах для відповідних транспортно-технологічних машин).*

*Публікації в наукових фахових виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз даних*

2. Dynamics of flexible elements of drive systems with variable contact point to the pulleys / M.B. Sokil, O.L. Lyashuk, A.P. Dovbush // INMATEH «Agricultural Engineering». – Bucharest, 2016. – Vol. 48, no. 1 / 2016. - P. 119-124. **(Scopus)**. *(Автор розробив методику впливу коливання гнучких елементів систем приводу на транспортування).*

3. Interpretation of the choice of conveyers with improved technological characteristics / I. Gevko, O. Lyashuk, A. Djachun, A. Dovbush // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. - Lublin–Rzeszow, 2015. – Vol. 17, no. 4 / 2015. - P. 107-116. *(Автором обґрунтовано вибір варіанта конструкції робочих органів для технологічного процесу транспортування).*

*Публікації в наукових фахових виданнях України*

4. Дослідження резонансних коливань трубчастих скребкових конвеєрів двовимірних елементів / С.М. Герук, А.П. Довбиш, О.Л. Ляшук, В.З. Гудь // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. “Технічні системи і технології тваринництва” – Харків, 2017. - Випуск 181. — С. 294-305. *(Автор отримав залежність максимальних динамічних зусиль у робочого органу).*

5. Герук С.М. Особливості конструкцій трубчастих конвеєрів / С.М. Герук, А.П. Довбиш // Збірник наукових статей. «Сільськогосподарські машини». - Луцьк, 2014. - Вип. 29-30 — С. 15-20. *(Автор запропонував та обґрунтував параметри конструкцій трубчастих конвеєрів).*

6. Дослідження коливань скребкових канатних робочих органів конвеєрів для транспортування насипних вантажів / С.М. Герук, О.Л. Ляшук, О.П. Скиба, А.П. Довбиш // «Перспективні технології та прилади»: збірник наукових праць. – Луцьк, 2015. – Вип. №7. – С. 17-22. *(Автор отримав залежність для визначення переміщень окремих точок робочого органа, що характеризують його коливання).*

7. Герук С.М. Вплив збурень коливань вібросепаратора на динаміку зернової суміші / С.М. Герук, А.П. Довбиш // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник «Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин». - Кіровоград, 2016. - Вип. 46. — С. 124-132. *(Автор отримав залежності для визначення резонансних коливань зернової суміші в процесі вібраційної обробки).*

8. Герук С.М. Математична модель динаміки зернової суміші під час її сепарації в трубчастому скребковому ланцюговому конвеєрі / С.М. Герук, А.П. Довбиш // Вісник Сумського національного аграрного університету «Серія механізація та автоматизація виробничих процесів». – Суми, 2016. – Випуск 10/2 (30). – С. 78-85. *(Автор отримав характеристики власних коливань зернової суміші під час руху вздовж сита вібросепаратора).*

9. Синтез конвеєрів з розширеними технологічними можливостями / О.Л. Ляшук, О.С. Голотенко, В.М. Клендій, А.П. Довбиш // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник «Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин». – Кіровоград, 2017. - Вип. 47. – С. 167-177. *(Автором проведений синтез трубчастих скребкових конвеєрів).*

10. Дослідження трубчастого скребкового конвеєра з просторовою трасою / І.Т. Ярема, Т.Б. Пиндус, А.П. Довбиш, М.Д. Радик // Міжвузівський збірник “Наукові нотатки”. - Луцьк, 2018. - Випуск 61. - С. 243-249. *(Автором обґрунтовано параметри трубчастого скребкового конвеєра).*

*Матеріали і тези конференцій*

11. Герук С.М. Дослідження динамічних навантажень у привідному ланцюзі конвеєра / С.М. Герук, А.П. Довбиш // Матеріали ХІХ наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя, 18-19 травня 2016 р.: тези допов. – Тернопіль: ТНТУ, 2015. – С. 40. *(Автор отримав аналітичну залежність максимального значення динамічної деформації ланцюга).*

12. Герук С.М. Вплив геометричних, кінематичних та фізико-механічних

параметрів на власні коливання робочого органу скребкового конвеєра / С.М. Герук, А.П. Довбиш О.Л. Ляшук // IV Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 25-26 листопада 2015 р.: тези допов. – Тернопіль : ТНТУ, 2015. – С. 169-171. *(Автор запропонував конструкцію робочого органа скребкового конвеєра).*

13. Герук С.М. Динамічні навантаження у привідному ланцюзі конвеєра під час резонансних коливань / С.М Герук, А.П. Довбиш // IV Всеукраїнська науково-практична конференція «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь», 28-29 березня 2018р.: тези допов. – Житомир : ЖАТК, 2018. – С. 284-285. *(Автор отримав динамічне напруження у прямолінійних ділянках ланцюга конвеєра).*

14. Герук С.М. До питання про визначення основних фізико-механічних характеристик зернової суміші / С.М Герук, А.П. Довбиш // IV Всеукраїнська науково-практична конференція «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь», 28-29 березня 2018р. : тези допов. – Житомир: ЖАТК, 2018. – С. 282-284. *(Автор запропонував методіку дослідження динаміки зернової суміші у процесі вібросепарації).*

#### *Патенти України на корисні моделі*

15. Пат. 108423 Україна, МПК В65G 25/00(2016.01). Гнучкий трубчастий сепаратор / Герук С.М., Ляшук О.Л., Довбиш А.П., Клендій В.М., Данилюк О.А.; заявники і патентоотримувачі Герук С.М., Ляшук О.Л., Довбиш А.П., Клендій В.М., Данилюк О.А. – № u201601512; заявл. 18.02.16; опубл. 11.07.16, Бюл. №13. *(Частка всіх авторів однакова).*

16. Пат. 109817 Україна, МПК В65G 19/00, В65G 33/00 (2016.01). Гнучкий трубчастий конвеєр з пересувним завантажувачем / Герук С.М., Довбиш А.П., Ляшук О.Л.; заявники і патентоотримувачі Герук С.М., Довбиш А.П., Ляшук О.Л. – № u201602117; заявл. 04.03.16; опубл. 12.09.16, Бюл. №17. *(Частка всіх авторів однакова).*

17. Пат. 112544 Україна, МПК В65G 19/00, В65G 35/00, В65G 35/02 Спарений робочий орган канатного конвеєра / Герук С.М., Довбиш А.П., Ляшук О.Л.; заявники і патентоотримувачі Герук С.М., Довбиш А.П., Ляшук О.Л.; – № u201602119; заявл. 04.03.16; опубл. 12.09.16, Бюл. №17. *(Частка всіх авторів однакова).*

18. Пат. 112544 Україна, МПК В65G 25/00(2006.01). Канатна установка для видобування сапропелів / Гевко Б.М., Дячун А.Є., Мельничук С.Л., Клендій В.М., Довбиш А.П.; заявники і патентоотримувачі Гевко Б.М., Дячун А.Є., Мельничук С.Л., Клендій В.М., Довбиш А.П. – № u201605417; заявл. 19.05.16; опубл. 26.12.16, Бюл. №24. *(Частка всіх авторів однакова).*

19. Пат. 124844 Україна, МПК В65G 33/08, (2006.01). Трубчастий ланцюговий транспортер / Герук С.М., Ляшук О.Л., Клендій В.М., Левкович М.Г., Довбиш А.П. Пиндус Т.Б.; заявники і патентоотримувачі Герук С.М., Ляшук О.Л., Клендій В.М., Левкович М.Г., Довбиш А.П. Пиндус Т.Б. – № u201710828; заявл. 06.11.17; опубл. 25.04.18, Бюл. №8. *(Частка всіх авторів однакова).*

## АНОТАЦІЯ

*Довбиш А.П.* Обґрунтування параметрів трубчастого конвеєра із сепаруючим бункером. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.05 «Піднімально-транспортні машини». – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2020.

Дисертаційна робота присвячена теоретичним і експериментальним дослідженням проектування й розрахунку конструктивних і технологічних параметрів робочих органів трубчастих ланцюгових скребкових конвеєрів, що дають змогу найефективніше транспортувати сипку продукцію.

Розроблено модель вибору конструктивних параметрів конвеєрів для транспортування сільськогосподарських матеріалів вздовж криволінійних траєкторій з урахуванням можливих обсягів витрат, що виникають внаслідок пошкодження матеріалу, сукупних витрат, які включають собівартість виготовлення, експлуатації, технічний огляд і ремонт.

Проведено синтез робочих органів конвеєрів методом ієрархічних груп за допомогою морфологічного аналізу. Обґрунтовано, що вибір варіанта конструкції робочих органів в першу чергу залежить від характеру виконання процесу і навантаження на робочий орган. Тому, виходячи з необхідності забезпечення проектування робочих органів, можна обмежити кількість варіантів конструктивних рішень і згенерувати значну кількість працездатних конструкцій конвеєрів для транспортування сипких матеріалів вздовж криволінійних трас.

Теоретичні розрахунки коливань привідного ланцюга конвеєра показали, що для різних швидкостей переміщення сипкого матеріалу за рахунок внутрішніх збурень руху можуть виникати резонансні коливання. Встановлено, зокрема, що амплітуда переходу через резонанс є більшою для більших швидкостей руху привідного ланцюга конвеєра; максимальне динамічне напруження у ланцюгу зростає із збільшенням швидкості транспортування сипкого матеріалу: збільшення швидкості транспортування від 1 м/с до 2 м/с спричиняє при  $n = 1,3$  та  $L = 20$  м збільшення динамічного напруження у 5,2 рази, а зростання швидкості від 2 м/с до 3 м/с за тих же параметрів – у 3 рази.

Розроблені конструкції трубчастих ланцюгових конвеєрів з різними робочими органами та стендове обладнання з використанням перетворювача частоти Altivar 71 та програмного забезпечення PowerSuite v.2.5.0 дозволили провести комплекс експериментальних досліджень з визначенням продуктивності, крутного моменту при транспортуванні сипкого матеріалу.

На основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень обґрунтовано основні параметри технологічного процесу транспортування та сепарації сипкого матеріалу. Результатом теоретичних та експериментальних досліджень є впровадження у виробництво.

**Ключові слова:** технологічний процес, ланцюг, трубчастий скребковий конвеєр, математична і динамічна моделі.

## АННОТАЦИЯ

Довбыш А.П. Обоснование параметров трубчатого конвейера с сепарирующим бункером. - Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.05 «Подъемно-транспортные машины». - Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2020.

Диссертация посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям проектирования и расчета конструктивных и технологических параметров рабочих органов трубчатых цепных скребковых конвейеров, что позволит эффективно транспортировать сыпучую продукцию.

Проведены теоретические расчеты колебаний приводной цепи конвейера, который транспортирует сыпучий материал за счет возмущений движения, обусловленных динамикой скребков вдоль угловых точек горизонтальной и вертикальной частей конвейера и установлены условия существования резонансных колебаний для различных скоростей перемещения сыпучего материала.

Установлено, что амплитуда перехода через резонанс увеличивается для больших скоростей движения приводной цепи конвейера, и одновременно максимальное динамическое напряжение в цепи возрастает с ростом скорости транспортировки сыпучего материала от 1 м/с до 2 м/с, что вызывает увеличение динамического напряжения в 5,2 раз, а рост скорости от 2 м/с до 3 м/с тех же параметров - в 3 раза.

Разработанные конструкции трубчатых цепных конвейеров с различными рабочими органами и стендового оборудования с использованием преобразователя частоты Altivar 71 и программного обеспечения PowerSuite v.2.5.0 позволили провести комплекс экспериментальных исследований по определению производительности, крутящего момента при транспортировке сыпучего материала.

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований обоснованы основные параметры технологического процесса транспортировки и сепарации сыпучего материала. Результатом теоретических и экспериментальных исследований является внедрение в производство.

**Ключевые слова:** технологический процесс, цепь, трубчатый скребковый конвейер, математическая и динамическая модели.

## ANNOTATION

*Dovbysh A.P.* Parameters substantiation of a tube chain conveyor with a separator bin. The qualification scientific work on the manuscript copyright.

Ph.D. thesis in Engineering Sciences with major in 05.05.05 «Materials-Handling Vehicle». Ternopil Ivan Pului National Technical University, Ternopil, 2020.

Thesis is dedicated to theoretical and experimental research on projecting and calculation of the technological and design requirements of working organs of tube drag chain conveyors that will give the opportunity to improve the friable material

transportation.

The theoretical calculation of driving chain fluctuations of a conveyor which transports friable material by means of oscillation excitation caused by drag dynamics along the salient points of horizontal and vertical conveyor parts have been made. The conditions of resonance vibrations for different speed rates of friable material transportation have been identified.

It has been established that the transition amplitude due to resonance is higher for higher speed rates of a driving chain, and a simultaneously maximal dynamic stress in a chain is higher when the speed rate of a friable material transportation increases from 1 m/s to 2 m/s. It causes a 5.2 times increase in dynamic stress, and a 3 times increase under a speed rate from 2 m/s to 3 m/s under the same parameters.

Methods of identifying their basic physical and mathematic characteristics as well as of physical and mathematic models of grain mixture dynamics during the process of friable material cleaning have been developed. It has been established that the vibration frequency of the friable material in the process of its cleaning depends on its vibration amplitude, with the nonlinear parameter a lower vibration frequency rate corresponds to higher vibration amplitude of a grain material along the sieve surface. It has been established that the speed effect (up to 1 m/s) of a grain mass movement along the sieve surface causes the decrease in proper vibration frequency (up to 4%), and the transition amplitude of a grain mixture due to resonance is higher for the lower initial rates of the difference between proper and forced vibration, that causes the separation process worsening.

The developed constructions of tube chain conveyors with different working organs as well as of test-bed equipment with the use of frequency changer Altivar 71 and software Power Suite v.2.5.0 made it possible to conduct a number of experimental research on identifying the productivity while transporting the friable material.

The main parameters of a technological process of friable material transportation and separation have been substantiated on the basis of theoretical and experimental research. The results of theoretical and experimental research have been introduced into production process.

*Key words:* technological process, chain, tube drag chain conveyor, mathematic and dynamic models.